mgr inż. Bogumiła Pałac-Walko*
dr hab. inż. Witold Pytel**

Recenzent: mgr inż. Krzysztof Jaśkiewicz

Odporność obiektów magazynowych w masywie solnym LGOM na zagrożenie generowane działalnością górniczą

Słowa kluczowe: warstwa reologiczna, eksploatacja filarowo-komorowa, modelowanie numeryczne

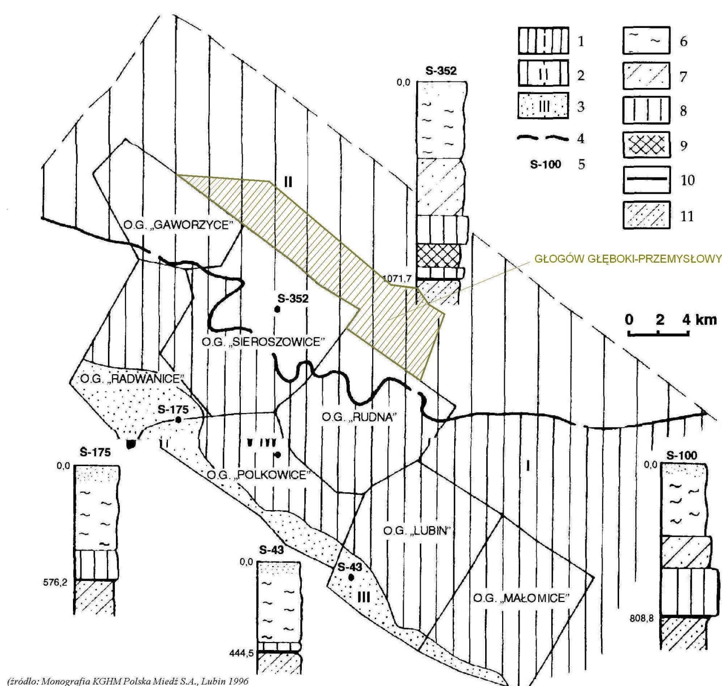
Streszczenie
Wybieraniu złoża rudy miedzi w północnej części monokliny przedsudeckiej towarzyszy oddziaływanie grubej (do 300 m) i rozległej warstwy soli kamiennej. Zważywszy na sprężysto-lepki charakter tych oddziaływań należy się liczyć z odmiennymi niż dotychczas, niekoniecznie bardziej korzystnymi, efektami geomechanicznej współpracy warstwy solnej z bardzo wytrzymałymi i słabo odkształcalnymi utworami cechsztyńskimi (dolomity, anhydryty). Z drugiej jednakże strony obecność bardzo szczelnego, o wyjątkowo niskiej wilgotności, materiału solnego tworzy warunki geologiczne szczególnie korzystne dla posadowienia podziemnych składowisk odpadów. Istotne jest zatem rozpoznanie wpływu eksploatacji górniczej prowadzonej poniżej utworów solnych na stateczność umieszczonych w nich komorowych obiektów magazynowych. W tym celu został wykorzystany trójwymiarowy model numeryczny dla złoża „Głogów Głęboki Przemysłowy" wykorzystujący metodę różnic skończonych obejmujący takie zjawiska jak pełzanie soli oraz jej niewielką wytrzymałość.

1. Wprowadzenie

Wybieraniu złoża rudy miedzi w północnej części monokliny przedsudeckiej towarzyszy oddziaływanie grubej (do 300 m) i rozległej warstwy soli kamiennej (rys. 1, 2). Zważywszy na sprężysto-lepki charakter tych oddziaływań należy się liczyć z odmiennymi niż dotychczas, niekoniecznie bardziej korzystnymi, efektami geomechanicznej współpracy warstwy solnej z bardzo wytrzymałymi i słabo odkształcalnymi utworami cechsztyńskimi (dolomity, anhydryty). Z drugiej jednakże strony obecność bardzo szczelnego o wyjątkowo niskiej wilgotności materiału solnego tworzy warunki geologiczne szczególnie korzystne dla posadowienia podziemnych składowisk odpadów. Istotne jest zatem rozpoznanie wpływu eksploatacji górniczej prowadzonej

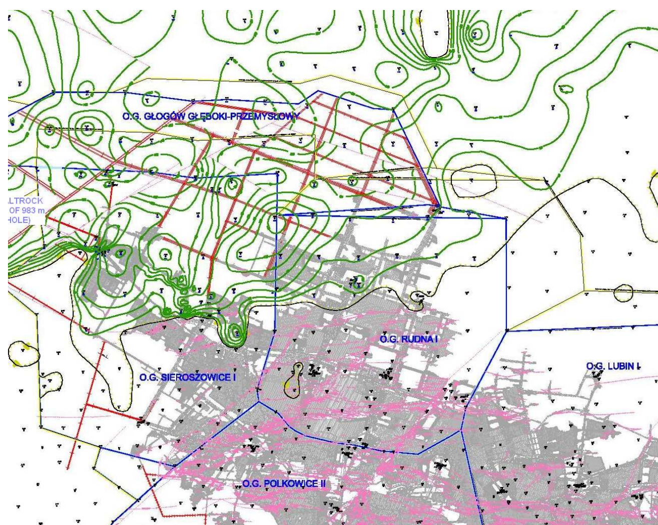
* Politechnika Wrocławska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Plac Teatralny 2, 50-051 Wrocław
** KGHM CUPRUM sp. z o.o. CBR, ul. gen. Wł. Sikorskiego 2-8, 53-659 Wrocław

poniżej utworów solnych na stateczność umieszczonych w nich komorowych obiektów magazynowych. W tym celu został wykorzystany trójwymiarowy model numeryczny dla złoża „Głogów Głęboki Przemysłowy" wykorzystujący metodę różnic skończonych obejmujący takie zjawiska jak pełzanie soli, oraz jej niewielką wytrzymałość, zwłaszcza na rozciąganie.
Wykonana w 2007 roku praca badawcza [1], poświęcona warunkom generowania oraz przebiegowi zjawisk geodynamicznych towarzyszących eksploatacji złóż na dużych głębokościach, pozwoliła wykazać na podstawie modelowania numerycznego, że obecność rozległej warstwy soli kamiennej w stropie zasadniczym prowadzi do kształtowania się nowych, niekorzystnych warunków geomechanicznych dla prowadzonej pod nią eksploatacji górniczej. Dokonane symulacje komputerowe procesu wybierania złoża rudy miedzi (rys. 3,4) w technologii z ugięciem stropu i podsadzaniem przestrzeni wybranej, wskazują na zagrożenie tąpaniami o wielkiej skali niezależnie od prędkości postępu frontu eksploatacyjnego, zwłaszcza w przypadku występowania pod warstwą reologiczną względnie cienkiej (do ok. 50 m) sztywnej półki anhydrytowo-dolomitycznej.

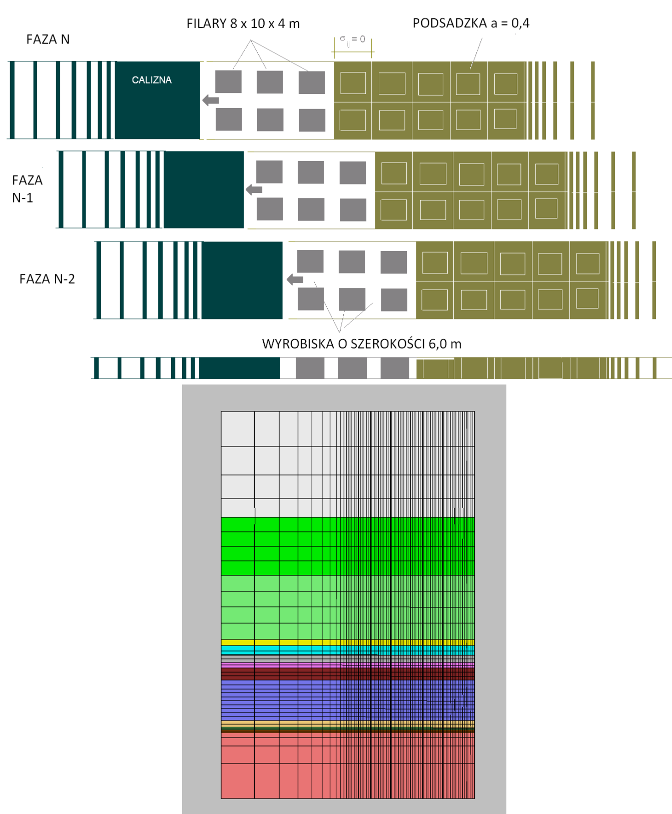


1 – obszar centralny; 2 – obszar północny; 3 – obszar południowy; 4 – południowa granica zasięgu soli kamiennej; 5 – model geotechniczny układu obciążającego; 6 – skały sypkie i spoiste; 7 – skały zwięzłe o niskiej wytrzymałości; 8 – skały zwięzłe o wysokiej wytrzymałości; 9 – warstwa reologiczna; 10 – złoże rud Cu; 11 – skały zwięzłe o bardzo niskiej wytrzymałości

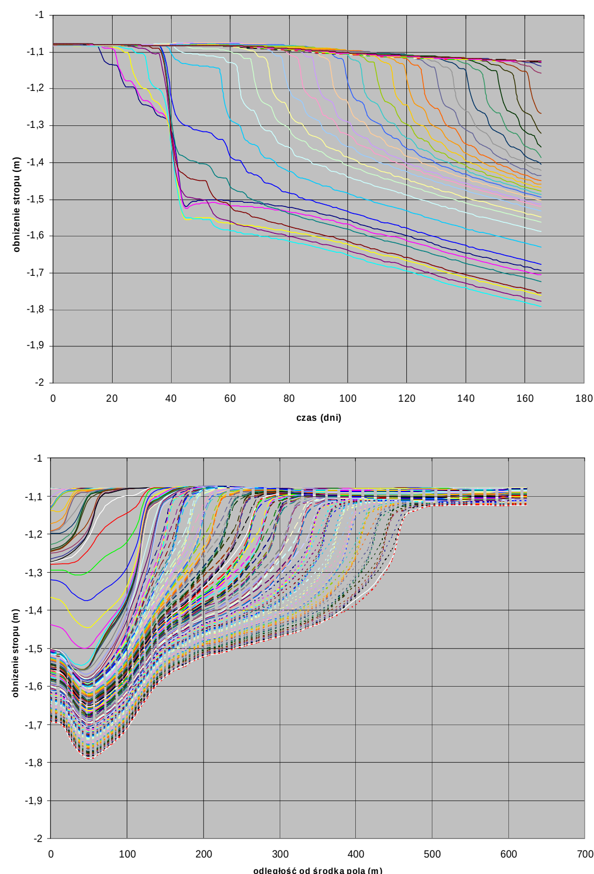
Rys. 1. Zróżnicowana budowa geologiczna w obszarach górniczych kopalń rudy miedzi KGHM jako podstawa wydzielenia rejonów o wyraźnie różniących się charakterystykach geomechanicznych (gruba linia ciągła – zasięg złoża soli kamiennej)



Rys. 2. Mapa miąższości soli kamiennej w obszarach górniczych kopalń rudy miedzi KGHM



Rys. 3. Schemat wybierania złoża (na lewo) symulowany przez model numeryczny sformułowany za pomocą MRS



Rys. 4. Obniżenia punktów stropu bezpośredniego w funkcji czasu (przyp. 1) oraz obniżenie linii stropu w miarę postępu eksploatacji (przyp. 1)

Mając na uwadze to, że charakterystyczną cechą dla obszaru górniczego Głogów Głęboki Przemysłowy jest obecność grubej warstwy soli kamiennej o zmiennej miąższości odseparowanej od złoża rudy miedzi sztywną półką anhydrytowo dolomityczną posiadającą również zróżnicowaną miąższość, zagadnieniem krytycznym w przypadku projektu i budowy podziemnych składowisk odpadów w grubej warstwie soli jest wiedza o oddziaływaniu na stateczność tego rodzaju podziemnych składowisk zewnętrznych czynników, z których najważniejszymi wydają się być:

– prowadzona pod złożem soli eksploatacja złoża rudy miedzi, oraz
– znaczne naprężenia poziome w skałach towarzyszących soli, mające swoje źródło w tektonicznych procesach deformacyjnych.

Zastosowanym narzędziem analitycznym, naturalnym w procedurach doboru parametrów systemów eksploatacji, jest analiza geomechaniczna wykorzystująca przestrzenny model sformułowany w ramach procedur metody różnic skończonych (MRS), uwzględniających efekty lepkościowe oddziaływania warstwy soli kamiennej (program FLAC3D).

Modelowanie numeryczne bazujące na MRS (MES) jest praktycznie jedyną metodą, która jest w stanie a priori, a więc już na etapie projektu, szukać w danych warunkach geologiczno-górniczych optymalnych, z punktu widzenia techniki i ekonomii, wariantów eksploatacji złoża w pobliżu istniejącego składowiska posadowionego w utworach solnych.

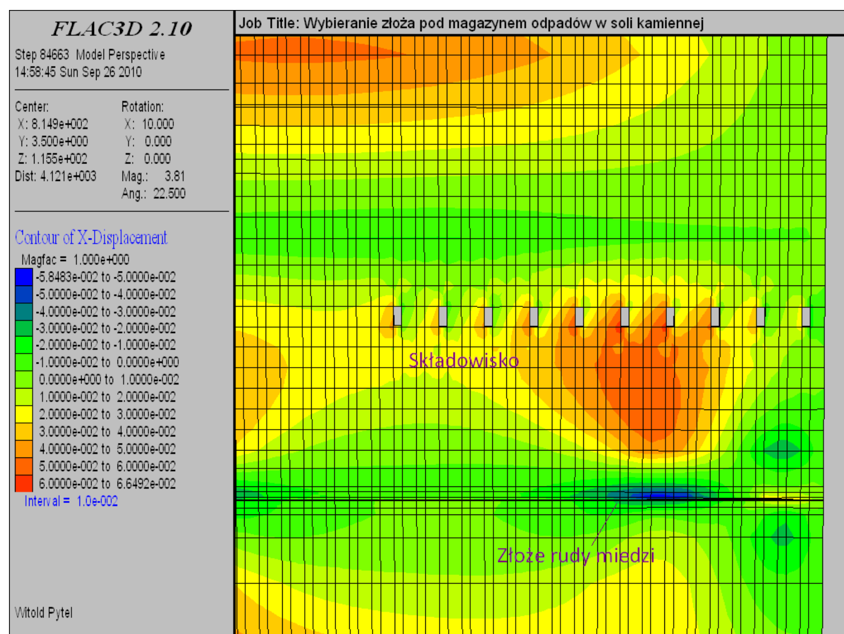
W następnych częściach pracy przedstawiono tok modelowania numerycznego dla przypadku eksploatacji filarowo-komorowej rudy miedzi pod składowiskiem odpadów.

2. Wpływ prowadzonej eksploatacji górniczej na stateczność istniejącego składowiska odpadów w warstwie soli kamiennej

Za pomocą pakietu Flac3d opartego na metodzie różnic skończonych zamodelowano eksploatację złoża w warunkach geotechnicznych opisanych w tab. 1 (patrz także rys. 3). Rozpatrzono model przestrzenny w postaci powtarzalnego wycinka górotworu o szerokości 7,0 m obejmującego trzy filary z przylegającymi wyrobiskami, a także przecinki pomiędzy filarami. Współrzędna x = 0 odpowiada zawsze położeniu środka pola eksploatacyjnego gdzie założono środek symetrii, co implikuje założenie o równoczesnej eksploatacji dwoma frontami sukcesywnie przesuwającymi się w dwóch przeciwnych kierunkach. Przyjęto:

- grubość półki dolomityczno-anhydrytowej: 34 m;
- grubość warstwy solnej: 154 m;
- prędkość postępu frontu: 0,768 m/dzień;
- podsadzka o efektywności 60% (współczynnik osiadania a = 0,4);
- składowisko odpadów w warstwie soli stanowi 20 wyrobisk korytarzowych o wymiarach 6 x 15,3 m rozdzielonych filarami oporowymi o szerokości 26 m (rys. 5).

Dla warstw stropowych (oprócz soli kamiennej) przyjęto model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra, natomiast dla skał spągowych model sprężysty. Zachowanie soli kamiennej opisano modelem lepko-plastycznym Maxwella charakteryzującym się lepko-sprężysto-plastycznym efektem odkształceń dewiatorowych oraz sprężysto-plastycznymi wpływami odkształceń objętościowych. Właściwości plastyczne materiału opisano modelem Coulomba-Mohra z niestowarzyszonym prawem płynięcia dla zniszczenia przy ścinaniu i stowarzyszonym prawem płynięcia przy zniszczeniu przy rozciąganiu.



Rys. 5. Rozkład przemieszczeń poziomych modelu obliczeniowego sformułowanego za pomocą programu FLAC3D

Wartości zastosowanych parametrów odkształceniowo-wytrzymałościowych soli znaleźć można w tabeli 1, natomiast parametr lepki elementu Maxwella scharakteryzowano wartością: η1 = 1,569E11 MPa sek. uzyskaną z analizy odwrotnej zachowania się w czasie obiektu rzeczywistego [2].

Eksploatacja złoża miedzi modelowana była jako proces narastający w czasie, z tym że strefa otwarcia frontu obejmowała trzy rzędy filarów o wymiarach 8 m x 10 m jak na rys. 3 (komory i przecinki o szer. 6,0 m), za którymi zlokalizowana była strefa likwidacji, gdzie były one usuwane, a powstała pustka była systematycznie podsadzana w miarę przesuwania się frontu.

Na rys. 6–9 przedstawiono obliczone linie obniżenia wybranych punktów stropu bezpośredniego nad wybieranym złożem i nad składowiskiem zlokalizowanym w utworach solnych, z tym że punkt nr 1 położony jest zawsze w środku powiększającego się wyeksploatowanego obszaru, natomiast pozostałe punkty oddalone są od siebie o 16 m, a ich numeracja wzrasta w miarę oddalania się od centrum pola.

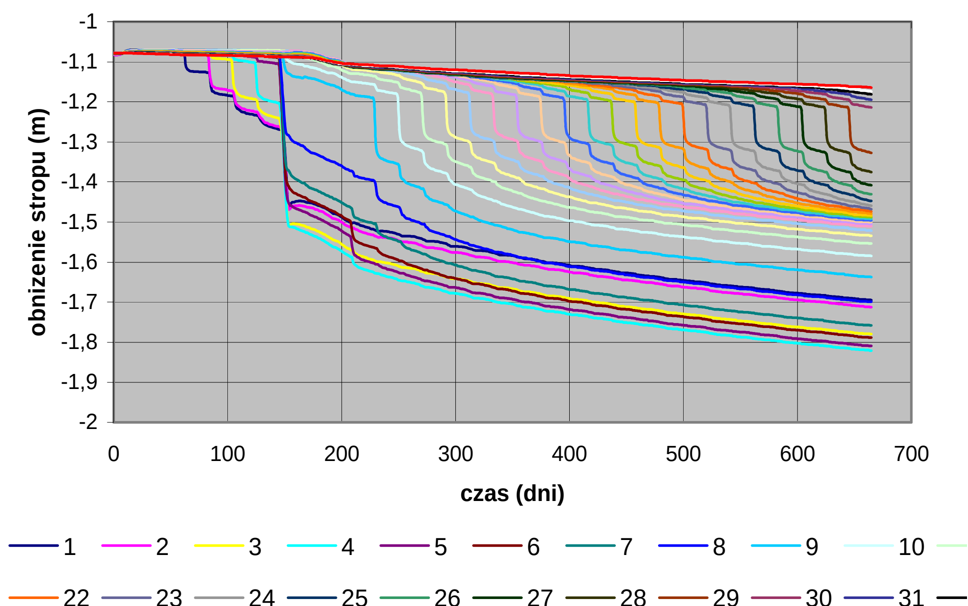
Stwierdzono, że maksymalne obliczone osiadanie linii stropu nad komorami magazynowymi wyniosło ok. 0,6 m, podczas gdy strop nad wybieranym złożem obniżył się o około 0,7 m. Jednocześnie zauważa się nieistotny wpływ obecności komór magazynowych na deformacje górotworu w strefie wybieranego złoża rudy miedzi (rys. 4,6,7). Różnica w wartości efektu dynamicznego na poziomie złoża (skok 0,4 m, rys. 6) i poziomie komór magazynowych (skok 0,1 m, rys. 8) jest natomiast bardzo znaczący i sugeruje, że na linii kontaktu soli i anhydrytu górnego nie musi pojawiać się szczelina o dużym rozwarciu.

Tabela 1

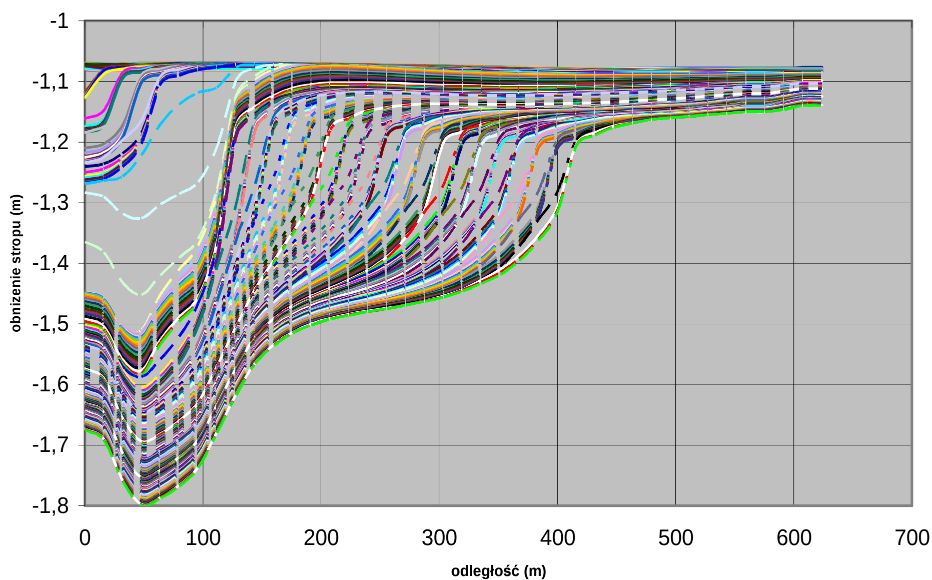
Parametry odkształceniowo-wytrzymałościowe ośrodka skalnego przyjęte do analizy numerycznej na podstawie odwiertu nr S-373A

Rodzaj materiału	Model materiału	Spójność (MPa)	Kąt tarcia wewnętrznego	Miąższość warstwy (m)	Rc (MPa)	Rr (MPa)	Eo (MPa)	E(r)	Współczynnik Poissona υ	
Utwory III i IV-rzędowe	Sprężysty	-	-	420	-	-	70	70	0,3	STROP
Środkowy pstry piaskowiec	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	4,22	65,4	220	38,7	1,84	13100	3275	0,16	
Dolny pstry piaskowiec	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	7,78	60,5	244	59,0	4,10	20700	5175	0,18	
Iłowiec Ł4	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	4,21	50,4	24	23,4	3,03	15000	3750	0,19	
Anhydryt główny A3	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	11,06	63,6	35	94,3	5,19	43600	10900	0,24	
Dolomit podstawowy Ca3	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	11,95	58,0	2	83,5	6,85	43100	10775	0,23	
Anhydryt podstawowy A2	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	11,67	63,9	26	100,6	5,42	50300	12575	0,24	
Dolomit główny Ca2	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	15,3	64,3	21	134,2	6,97	63500	15875	0,24	
Anhydryt górny A1g	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	10,67	63,1	46	89,4	5,10	46100	11525	0,26	
Sól kamienna Na1	Plastyczno-lepki Maxwella	3,02	61,74	154	24,0	1,52	3414	3414	0,48	
Anhydryt dolny A1d	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	14,0	59,4	26	102,3	7,66	58400	14600	0,26	
Wapienie i dolomity Ca1	Sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra	22,37	63,1	8	187,1	10,7	82200	20550	0,25	
Wapienie i dolomity Ca1	Sprężysty	-	-	2	187,1	10,7	82200	20550	0,25	FURTA
Łupek miedzionośny Ł1	Sprężysty	-	-	0,5	55,4	4,02	21700	10850	0,21	
Piaskowiec kwarcowy, ilasty	Sprężysty	-	-	0,5	17,7	0,52	8110	8110	0,16	
Piaskowiec kwarcowy, ilasty	Sprężysty	-	-	10	17,7	0,52	8110	8110	0,16	SPĄG
Piaskowiec kwarcowy ilasto-żelazisty	Sprężysty	-	-	250	9,45	0,21	5000	5000	0,15	

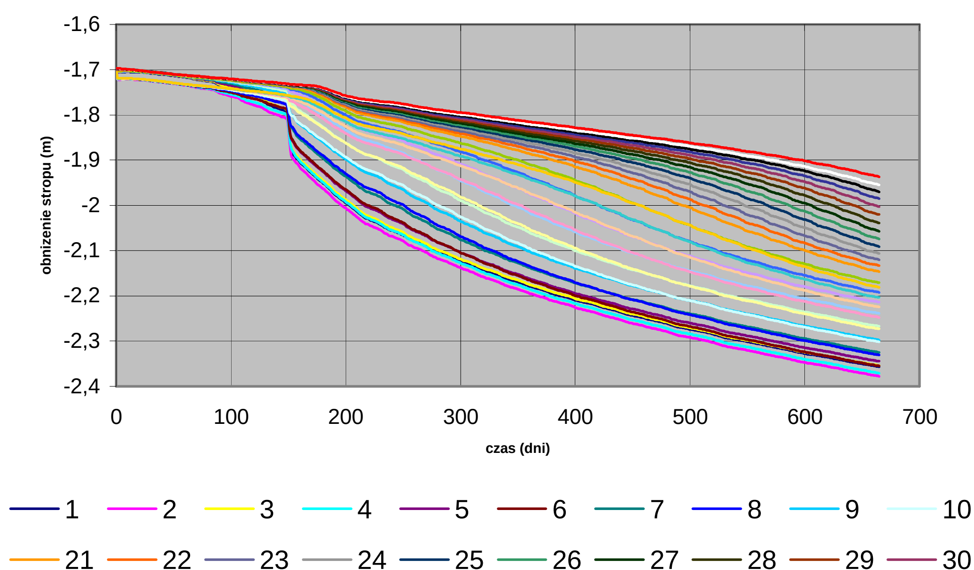
dla modelu sprężysto-plastycznego Coulomba-Mohra – niestowarzyszone prawo płynięcia dla zniszczenia przez ścinanie, oraz stowarzyszone prawo płynięcia dla zniszczenia przez rozciąganie



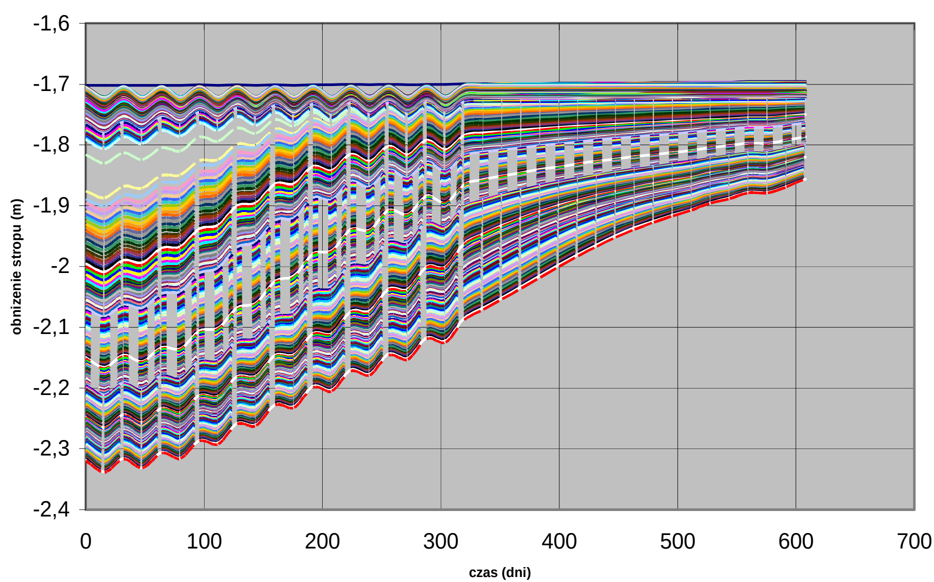
Rys. 6. Obniżenie punktów stropu bezpośredniego nad złożem rudy miedzi w funkcji czasu



Rys. 7. Obniżenie powierzchni stropu nad złożem rudy miedzi w funkcji czasu



Rys. 8. Obniżenie punktów stropu składowiska w funkcji czasu



Rys. 9. Obniżenie powierzchni stropu nad składowiskiem w funkcji czasu

3. Wnioski końcowe

Wyżej przedstawione wyniki modelowania numerycznego, a także wyniki pracy badawczej zamieszczone w [1], pozwalają wyciągnąć następujące wnioski co do roli warstwy reologicznej w zagadnieniu bezpiecznej eksploatacji złoża na dużej głębokości:

1. Obecność soli kamiennej w stropie eksploatowanego górotworu wprowadza inne warunki pod względem poziomu bezpieczeństwa, niż ma to miejsce w przypadku prowadzenia eksploatacji w górotworze pozbawionym utworów solnych. Jak wykazały obliczenia, teoretycznie możliwe niekorzystne zjawiska geomechaniczne mogą wystąpić w przypadku pojawienia się nieciągłości na kontakcie soli i anhydrytów górnych A1g, umożliwiającej rozwój zjawiska deformacyjnego o dużej skali. Zjawisko tego rodzaju ma swoją przyczynę przede wszystkim we względnie niskich wartościach parametrów wytrzymałościowych utworów solnych, szczególnie wytrzymałości na rozciąganie, a także w znacznej miąższości pokładu soli.
2. Wspomniane wyżej przemiany w warunkach geomechanicznych pracy górotworu nie muszą jednak prowadzić do niestateczności w obrębie składowisk odpadów zlokalizowanych w nawet znacznie przemieszczających się (pionowo) utworach soli kamiennej.
3. Można spodziewać się, że odporność obiektów magazynowych na zagrożenie generowane działalnością górniczą zależy od wzajemnej relacji szeregu parametrów układu, z których najważniejszymi wydają się być:
   a) grubość sztywnej półki dolomitowo-anhydrytowej bezpośrednio nad złożem,
   b) wytrzymałość skał złożowych,
   c) wymiary filarów technologicznych w strefie rozcinki,
   d) szerokość otwarcia frontu eksploatacyjnego,
   e) sposób kierowania stropem, a w szczególności skuteczność podsadzania,
   f) miąższość warstwy solnej zlokalizowanej w stropie zasadniczym (nad polem eksploatacyjnym),
   g) długość frontu eksploatacyjnego,
   h) wysokość furty eksploatacyjnej,
   i) wielkość powierzchni wybranego złoża,
   j) charakterystyka geometryczna układu komór magazynowych.

Wpływ każdego z wymieniowych parametrów powinien być określony liczbowo na podstawie przeprowadzonej analizy wrażliwości układu na zmiany ich wartości.

Artykuł powstał w ramach działalności statutowej finansowanej w 2010 r. przez Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, jako część zadania badawczego pt. „Odporność obiektów magazynowych w masywie solnym LGOM na zagrożenia generowane działalnością górniczą i naturalnymi procesami tektonicznymi."

Literatura

[1] Butra J., P. Kijewski, W. Pytel, Warunki generowania oraz przebieg zjawisk geodynamicznych towarzyszących eksploatacji złóż na dużych głębokościach przy obecności warstwy reologicznej w stropie, Umowa nr 1580/T12/2005/28, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Warszawa.

[2] Pytel W., J. Butra, 2006, Dimensioning of Salt-Rock Pillars in "Polkowice-Sieroszowice" Copper Deep Mine Based on FEM, Proc. 4th Asian Rock Mechanics Symposium (C.F. Leung, Y.X. Zhou eds.), 91-ARMS-A0211, World Scientific, Singapore.

Strength of large storage facilities located within LGOM saltrock against mining activity

Key words: rheological layer, room and pillar mining system, numeric modelling.

Mining operations planned within the Northern part of the Foresudetic Monocline copper ore is associated with a new and extremely important element of the local overburden structure, within which a very thick (up to 300 m) and aerially extended salt rock stratum has been identified. Such a geological conditions may suggest to use salt as a host rock for underground waste storage facilities.
However, the understanding of the mechanism of interaction between the salt layer and the overburden different rock strata (dolomite, anhydrite), requires developing a multi-parameter numerical analysis involving rheological and safety aspects of rock mass behavior. The 3-D bedded rock mass model suitable for the "Deep Glogow" area will be developed, utilizing the finite difference method involving rock mass creep behavior as well as bed separation and hard rock pillar failure phenomena.